

遺伝的アルゴリズムと全応力設計を用いた トラス構造物の構造形態決定†

朝山正輝*・安納達弥**・川面恵司***

ABSTRACT This paper presents layout (topology, shape and node position) optimization, under stress constraint, of trusses whose members are described as the discretized cross-sectional areas by using genetic algorithm (GA). The size optimization problems were successfully solved by hybrid method combining GA with fully stressed design (FSD), and the result was reported in the previous paper. In this case, the cross-sectional areas of the members, the topology (i.e. the arrangement of the members), where the members assigned with extremely small cross-sectional areas are considered "not to exist", and the positions of the nodes are chosen as design parameters. The hybrid method are tested for four kinds of the structures with convergence parameters varied in FSD. From the test results the Authors confirm that the hybrid method is efficient and stable in search for globally optimal layout, in layout optimization.

1. 緒言

応力制約下でトラスのレイアウト（位相，部材断面積および節点位置を今後レイアウトと呼ぶ）最適化問題，つまり部材断面積および節点位置を同時に決定する重量最小化問題に遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm，以下GAと呼ぶ）を適用した結果を報告する．この問題は一種の組合せ問題であり，また，非凸計画問題である．

トラスの位相最適化問題の求解例としてはつぎのものがある．坂本と尾田は部材断面積の決定に最適性基準法を，部材の有無（すなわち，位相の決定）にGAを用いるハイブリット法を用いて位相と部材断面積を同時に決定している¹⁾．中西と中桐は代数トポロジーにおける境界輪体を利用して構造をループの集まりで表現し，力の平衡条件を満足する構造を選び出し，位相と部材断面積を最適にする構造を決定している^{2,3)}．また，山崎は9節点28部材トラスを対象にトンネル法

により位相と部材断面積を設計パラメータとすることにより形態を決定している⁴⁾．トラスの節点位置と部材断面積を同時に決定する最適設計解を得ようという問題は，従来から数理計画法などの格好のテーマとして取り上げられてきた．しかし，最近では創発的方法を利用した例が報告されている．石田らはIRM（Immune Recruitment Mechanism）とGAを組み合わせたGIRMにより，9節点10部材トラスについて節点位置のみを移動することによる重量最小設計解を得ている⁵⁾．また，富田と登坂はGAを基本にし，これにシミュレーテッド・アニーリング（simulated annealing）の考えを取り入れ，突然変異率を可変にして探索を大域から局所に移行できるように工夫し，この方法を節点移動と部材断面積を設計パラメータにとり変位モードと一次固有振動数を制約条件とした重量最小化問題を解くアルゴリズムを提案している⁶⁾．

著者らは先に応力制約のもとでのトラスの寸法最適化問題にGAと全応力設計（Fully Stressed Design，以下FSDと呼ぶ）を組み合わせたハイブリット法による重量最小設計を行ない，このハイブリット法が収束性や安定性の点で優れていることを報告した⁷⁾．

このハイブリット法を用いて，部材の有無，部材断面積を設計パラメータとするトラスの重量最小の形態（layout）問題，さらに節点位置の移動を設計パラメータに加えた重量最小のレイアウト問題を解くアルゴリズムを提案し，幾つかのトラスに適用してこのアル

Layout Problem of Truss Structures Using Genetic Algorithm.
By Masateru Asayama (Photo Products Division, Nikon Corporation), Tatsuya Annoh (Oracle Corporation Japan) and Keishi Kawamo (Dept. of Mechanical Control Systems, Shibaura Institute of Technology).

*㈱ニコン カメラ事業部

**日本オラクル㈱

***芝浦工業大学機械制御システム学科

†1997年10月29日受付 1998年3月12日再受付

ゴリズムの有効性を検討することにする。

2. 体積最小化問題と GA の適用

2.1 最適化問題の定式化

応力制約を受けるトラス構造物の体積最小化問題を以下のように定式化する。

$$\text{Find } A_j \quad (1)$$

$$\text{Such that } V = \sum_{j=1}^m l_j A_j \rightarrow \text{minimize} \quad (2)$$

$$\text{Subject to } |\sigma_{\max}| \leq \sigma_{al} \quad (3)$$

ここで、 j は部材番号、 m は部材総数、 l_j, A_j は部材 j の長さ と断面積を表している。 σ_{al} は許容応力である。座屈を考慮しない場合は引張り側と圧縮側の許容応力を正の等しい値とする。また、部材断面積は後述の表2と表12のように断面積をランクに対応させ、ランクで表す。したがってこのランクを2進数で表現したストリングが部材断面積の情報となる。

2.2 GA へのコーディング

2.2.1 断面積決定問題

離散化された部材断面積を設計変数としたトラス構造物を1次元の遺伝子情報として表現する。例として、4部材トラスの部材断面積の組合せ情報を遺伝子にコーディングした場合を図1に示す。同図が示すように、1つのトラスを表現する遺伝子情報(ストリング)は、これを構成する部材断面積の情報(サブストリング)から構成されている。図2に示すように部材断面積情報の種類を最大32まで選べるように5ビットのサブストリングで表現した。交叉と突然変異は個々のサブストリングごとに独立に行う。交叉はすべて一点交差、突然変異も1ビットの数値を反転させることにより行なう。節点の位置情報については後述する。

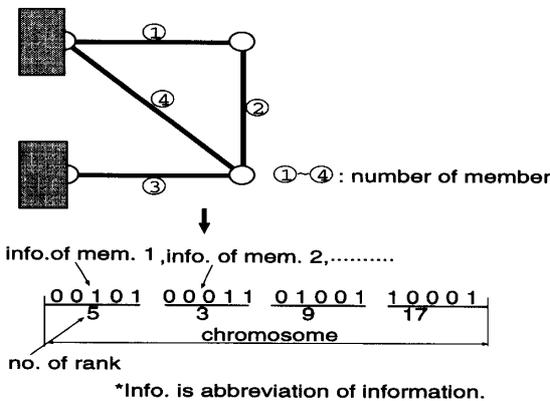


図1 トラス構造の個体へのコーディング

本論文では、このように表現された個体に対する世代 t における適応度には以下の式を用いる。

$$\phi_i(t) = (1 - V_i(t)/V_0) + k\{1 - \max(|\sigma_{ij}^t|/\sigma_{al}^j)\} \quad (4)$$

ただし、

$$k = \begin{cases} 0.25 & (\max(|\sigma_{ij}^t|/\sigma_{al}^j) \geq 1) \\ 0 & (\max(|\sigma_{ij}^t|/\sigma_{al}^j) < 1) \end{cases}$$

式(4)中の i は個体番号、 V_0 は初期体積、 $V_i(t)$ と σ_{ij}^t はそれぞれ t 世代における個体 i の体積と部材 j の応力、 σ_{al}^j は許容応力、 $\max(|\sigma_{ij}^t|/\sigma_{al}^j)$ は $|\sigma_{ij}^t|/\sigma_{al}^j$ ($j=1, 2, \dots, m$)のうち最大の値であることを示す。この式(4)は文献7)で用いている式と同じであり、重量最小化問題を式(4)によって適応度に関する最大化問題に変換している。またペナルティ係数の値は数値実験によって定めた。

2.2.2 レイアウト最適化問題

富田と登坂は節点 i の位置 (x_i, y_i) が閉区間 $[L_{xa}, L_{xb}]$ および $[L_{ya}, L_{yb}]$ 内で移動するとき、 n を0~255までの整数(これを8ビットの2進数で表現)で表現し、節点位置を次式で表わしている⁶⁾。

$$x_i = L_{xa} + (L_{xb} - L_{xa})n/255$$

and/or

$$y_i = L_{ya} + (L_{yb} - L_{ya})n/255 \quad (5)$$

筆者らはこの表現方法をそのまま使い、レイアウトを表現するストリングとして図2に示すように部材断面積情報に続けて節点移動情報をコード化した。

また、筆者らは円形域内の任意の位置で節点が移動できるように文献6)を参考にして次のように工夫した。

図3において r は半径方向移動量で、 x 方向、 y 方向の移動量 (dx, dy) は以下の式から得られる。

$$dx = r \times \cos \theta, \quad dy = r \times \sin \theta \quad (6)$$

ただし、

$$r = R \times n/255, \quad \text{and} \quad \theta = 2\pi \times n/255 \quad (7)$$

ここで、 R は最大移動可能半径、 n は0~255までの整数である。節点を x 方向あるいは y 方向のいずれかに移動可能な場合は式(5)を、同時に x, y 方向に移

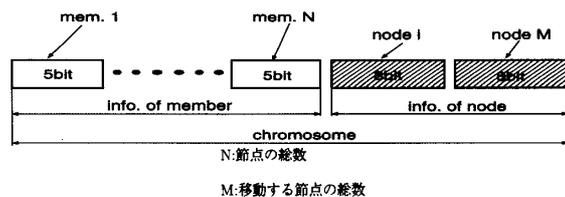


図2 染色体の構成(1)

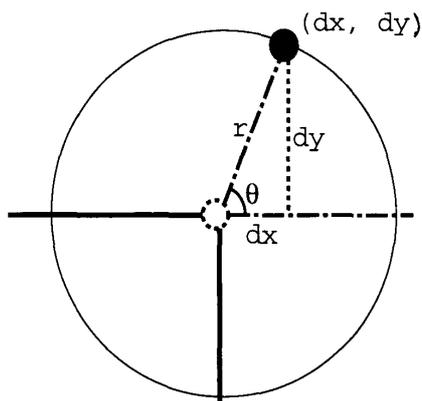


図3 円形領域内の節点移動

動する場合は式(6), (7)を用いることにした。

3. 全応力設計の導入

GAに全応力設計の式(8)を組み合わせる。トラスの最適設計では、しばしば式(8)によって部材断面積を逐次修正していく方法が用いられる。この方法を用いると、最終的にはすべての部材に生ずる応力はすべて許容応力となるので、「全応力設計」と呼ばれている。しかし、構成部材の強度が異なる場合には、FSDのみ単独で用いたのでは必ずしも大域的最適解が得られるとは限らないという報告例がある^{8,9)}。そこで筆者らは前報でGAとFSDを組み合わせたハイブリッド法によりFSDの持つこの欠点を回避した⁷⁾。

また、FSDの適用は事前の数値実験の結果を参考にして2世代に1回行なうことにした。

$$A_j^i = (|\sigma_{ij}^t| / \sigma_a^j)^a A_j^{i-1} \quad (8)$$

i は世代番号 ($i \geq 1$), a は定数であり、静定トラスでは、 $a=1$ の時には1回の計算ですべての部材の応力は許容応力になる。不静定トラスでは $a=0.6 \sim a=0.8$ が用いられている。

式(8)で得られた断面積と表2のように与えられている断面積との差をとり、その差が最小である断面積のランクを選択して、遺伝子(サブstring)を改善する。

4. 数値実験例

4.1 構造位相と部材寸法の決定問題

まず、トラスの位相と部材断面積を設計パラメータとする体積最小化問題を検討する。

4.1.1 指数 a の検討

式(8)における指数 a の値を1より小さくすればす

るほど変更される A_j^i は小さく計算されるので、 a は一種の緩和指数といえる。そこで以下のことが考えられる。指数 a に高い値を設定すると最適解への収束は早い、非最適解へ収束するとか、激しく振動して解が求められないなどが考えられる。他方、指数 a をあまり低く設定すると、最適解へ収束する可能性は高まるが、高い収束性は期待できない。そこで、幾つかの数値実験から適切な指数 a を調べることにする。

10部材トラス(構造A)と14部材トラス(構造B)を解析対象構造としてそれぞれ10回ずつ数値実験を行なう。GAのパラメータを表1に示す。スケールングには式(9), (10)で表される線形スケールングを用いる。

$$f_i(t) = -b\phi_i(t) + d \quad (i=1 \sim N) \quad (9)$$

$$b = \phi_{ave}^t (C-1) / (\phi_{ave}^t - \phi_{min}^t),$$

$$d = \phi_{ave}^t (C\phi_{ave}^t - \phi_{min}^t) / (\phi_{ave}^t - \phi_{min}^t) \quad (10)$$

ここで、 N は節点総数、 $\phi_i(t)$ は式(4)で定義されている世代 t における適応度、 $\phi_{ave}^t, \phi_{min}^t$ は世代 t における全個体に関する平均適応度と最小適応度である¹⁾。 $f_i(t)$ は個体の繁殖、淘汰を制御するための適応度関数である。また、図4に示すように線形変換関数式(9)(10)は係数 C の選び方によって $f_i(t)$ は $\phi_i(t)$ に関する単純減少関数あるいは単純増加関数になる。そこで今回は $C < 1.0$ の単純増加型を選び、 $f_i(t)$ の最大化問題とした。本報告では、 C の定数を0.5とした。こうすると、 $\phi_i(t)$ に比べて $f_i(t)$ は2倍にスケールングされる。

4.1.2 構造A(10部材トラス)

表1 GAパラメータの値

type	rank	string	population size	crossover	mutation
A	29	50	40	0.8	0.01
B	3	28	40	0.8	0.01

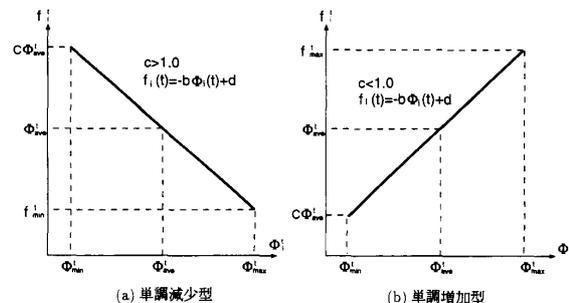


図4 適応度の線形変換

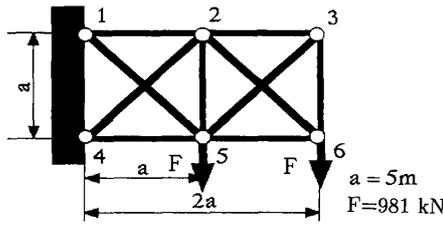


図5 構造A

表2 部材断面積リスト (構造A)

rank	cross.area(cm ²)	rank	cross.area	rank	cross.area
0	1.00	10	133.60	20	238.20
1	22.72	11	138.80	21	259.40
2	29.94	12	148.80	22	278.70
3	38.36	13	163.90	23	301.70
4	54.08	14	167.10	24	319.20
5	67.55	15	179.10	25	343.80
6	70.21	16	195.40	26	349.40
7	80.42	17	209.40	27	400.50
8	90.64	18	217.90	28	451.60
9	100.90	19	221.90	29	502.70

図5に示す10部材トラスは、最適設計問題によく取り上げられる構造である。

構造体の全体寸法、荷重および境界条件は文献7)と同じにとった。選択可能な部材断面積を表2に示す。同表中のランク0(部材断面積1cm²)はランク1のそれと比べて極端に小さくした。これはランク0を割り当てられた部材は軸力負担能力がほとんど無視し得るほど小さいので、このような部材は事実上「存在しない」として、構造位相上では無視する。この方法は文献10)でも用いられている。表2のランク1~ランク29は文献7)11)で使用したのと同じである。

すべてのGAプロセスは式(8)における指数 a を0.4, 0.6, 0.8, 1.0と変えて各部材に最も大きな断面積(ランク29)を割り当てた状態(このときの体積を初期体積と呼ぶ)から始めた。GAプロセスはすべて100世代で打ち切った。図6に世代-平均体積比、図7に世代-平均適応度を示す。図6のたて軸の平均体積比は(各世代における構造の体積)/(初期体積)の全個体平均である。同図によりGAプロセスはいずれの場合も安定しており、ハイブリット法(GA+FSD)は単純GAと比較して収束性、最適性の面で優れていることがわかる。

最終形状はいずれの指数の場合も図15に示す構造に

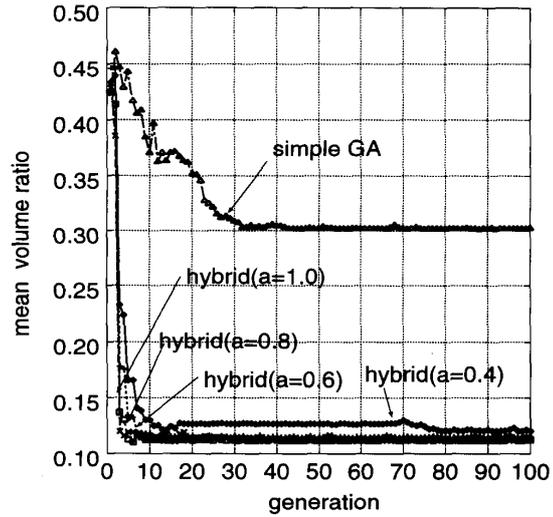


図6 世代-平均体積比

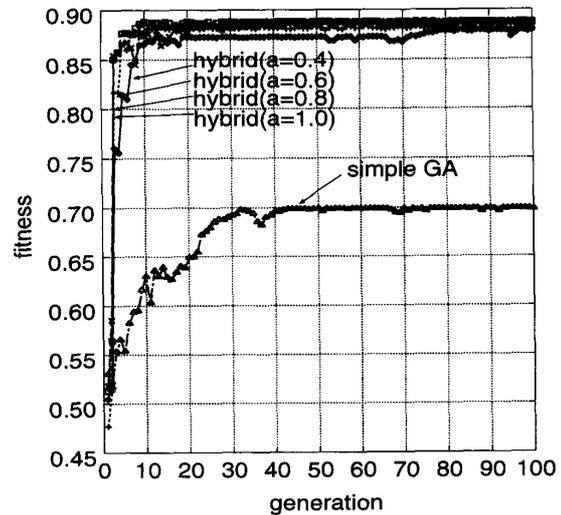


図7 世代-平均適応度

ほとんど類似しているのを省略した。

4.1.3 構造B (14部材トラス)

構造Bを図8に示す。この場合は選択できる部材断面積を1.0, 50.0, 100.0(mm²)に限った。同構造は尾田と岡田のニューラルネットワークによるトラスの最適設計に用いられた構造と部材断面積である¹⁰⁾。このように差の大きい部材断面積を選んだのは意図的に収束プロセスを不安定にさせるためではないかと思われる。指数 $a=0.6, 0.8, 1.0$ の場合について、それぞれ10回試行計算(以降、断りのない限り試行数は10回とする。)を行ない、それぞれの試行における世代-平均適応度の変化および世代-平均体積比の変化を見る。

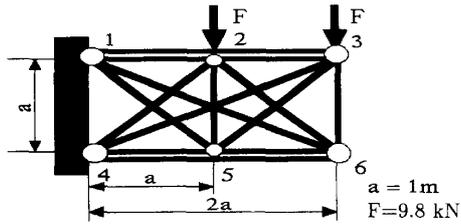


図8 構造 B

表3 最終結果 (構造 B) (第一回目)

	volume ratio	fitness	final generation
simple GA	0.507047	0.471954	26.60
	0.070264	0.061718	6.04
hybird (a=0.6)	0.318332	0.662680	25.70
	0.035017	0.017679	7.80
hybrid (a=0.8)	0.315422	0.658266	23.40
	0.065734	0.062082	9.38
hybrid (a=1.0)	0.339061	0.657419	21.80
	0.066543	0.033591	9.14

*Numerical values of table.3 are mean values of ten trials
 **Upper rows show mean values
 ***Lower rows show standard deviations

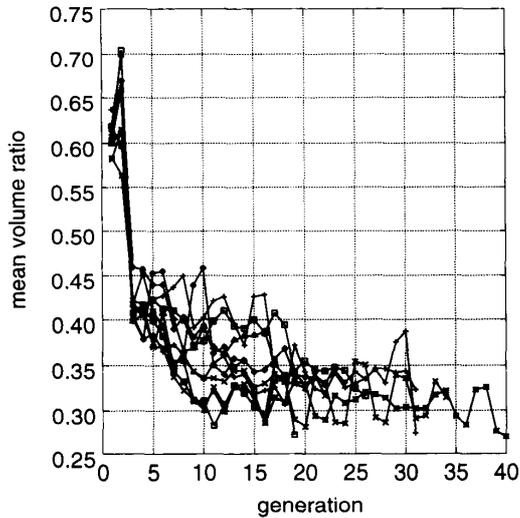


図9 世代-体積比 (a=0.6)

終了条件は80%以上の個体が同一となれば終了としている。

表3は最終結果における体積比, 平均適応度, 終了世代数の10回試行平均である。各項目の上段が平均値であり, 下段が標準偏差である。ハイブリッド法により得られた最終世代における体積比, 平均適応度および

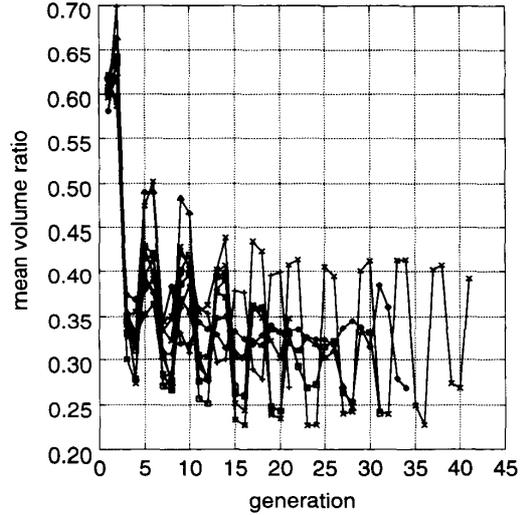


図10 世代-体積比 (a=0.8)

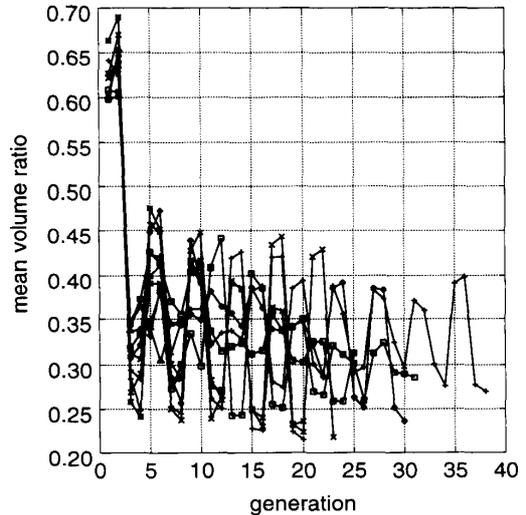


図11 世代-体積比 (a=1.0)

び終了世代数は指数 a によって大きく異なることはなかった。単純 GA はハイブリット法と比較して, 終了世代数が最も多く, 体積比や平均適応度も劣っている。

図9~図11は指数 $a=0.6, 0.8, 1.0$ の場合について, それぞれの試行における世代-平均体積比の変化を示している。指数 $a=0.8, 1.0$ の場合は世代に対して大きく振動しているが, 指数 $a=0.6$ の場合にはこの振動が多少抑えられており, a の影響が多少認められる。その理由は前述したように断面積の値の大きく異なる3種類の部材を設定したことにより構造 A の場合に比べて最適化プロセスにおける体積比の曲線が大

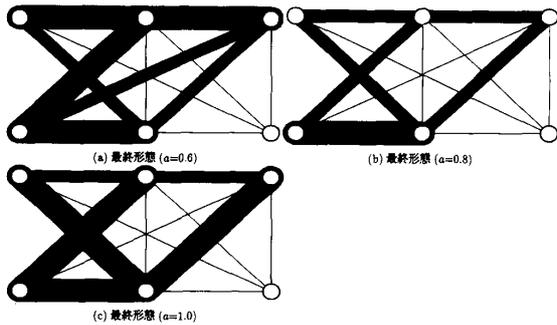


図12 各指数に対する最終形状 (構造 B, 第一回目)

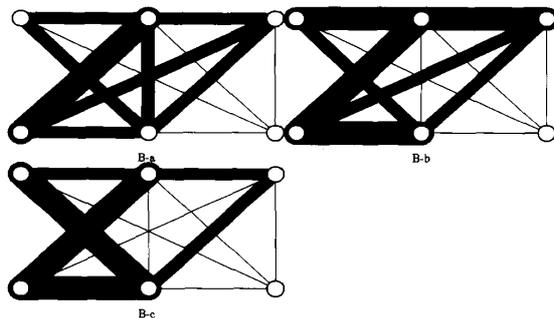


図13 構造形態 (構造 B) (第一回目)

表4 構造形態の分類 (構造 B) (第一回目)

係数 a	構造形態		
	B-a	B-b	B-c
0.6	1	5	4
0.8	0	7	3
1.0	0	8	2

大きく振動したものである。

それぞれの指数における試行のうち、終了世代における体積比が最も小さい個体の最終形態を図12に示す。

構造形態とその発生頻度は図13と表4に示す通りである。

それぞれの指数で終了世代における体積比が最も小さい個体の最終形態を (図12参照) もとに、ランク0の部材断面積を有する部材を除去した構造についてそれぞれ第一回目と同じ条件で再計算を行なった。その結果を表5に示す。条件およびGAパラメータは第1回目と同じである。そのときの構造形態の分類と発生頻度を図14と表6に示す。

以上の数値実験により第1回目の計算では形態 B-b

表5 最終結果 (構造 B) (第二回目)

item	$a=1.0$	$a=0.8$	$a=0.6$
volume ratio	0.285791	0.289304	0.288975
	0.023302	0.022494	0.039413
fitness	0.743767	0.740254	0.719559
	0.031034	0.030050	0.050178
generation	7.80	12.10	23.10
	5.71	6.88	14.13

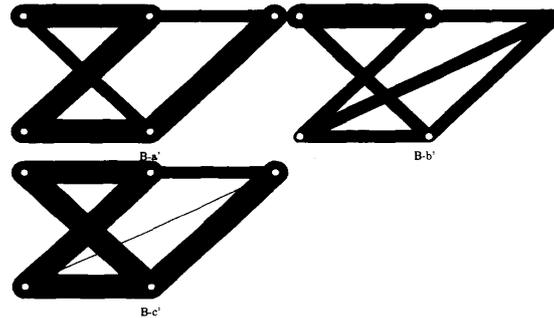


図14 構造形態 (構造 B) (第二回目)

表6 構造形態の分類 (構造 B) (第二回目)

係数 a	構造形態		
	B-a'	B-b'	B-c'
0.6	0	6	4
0.8	10	0	0
1.0	10	0	0

が創成される確率が高く、ついで B-c' である。第2回目の計算では指数 a が0.8, 1.0の場合には100% B-a' が創成された。 a が0.6の場合には B-c' (これは実際上は B-a' と同じ) と B-b' がほぼ同率で発生している。表3と表5の比較から、第2回目の結果は第1回目比べて、体積比が $a=0.6, 0.8$ で10%, $a=1.0$ で約20% 改善していることがわかる。また、構造形態では他の例と同様に中間の節点をまたがる長さ $2a$ の部材は存在しなかった。以上から $a=0.8$ 程度で1回目に最適化計算を行ない、ランク0の部材を取り除き、再度計算を行なうと最適解に近い解が求められる。

4.1.4 座屈の考慮

前節で解析した構造 A と構造 B に対して、さらに座屈を考慮して最適化を行なってみる。ここで、部材 j における引張と圧縮応力制約を以下のように定義す

表7 最終結果 (構造 A, 座屈考慮)

item	1.0	0.8	0.6
volume ratio	0.187293	0.183175	0.188373
	0.037527	0.004194	0.000419
fitness	0.777989	0.804131	0.811414
	0.036900	0.007028	0.000517
generation	35.2	32.1	15.3
	19.59	11.52	2.28

表8 最終結果 (構造 B, 座屈考慮) (第一回目)

item	1.0	0.8	0.6
volume ratio	0.624161	0.668894	0.646308
	0.039272	0.050226	0.042556
fitness	0.307436	0.311407	0.348365
	0.037863	0.027770	0.041455
generation	18.4	24.1	10.1
	6.13	17.08	3.48

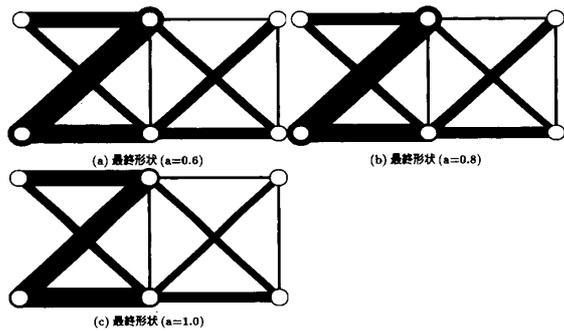


図15 各指数に対する最終形態 (構造 A, 座屈考慮)

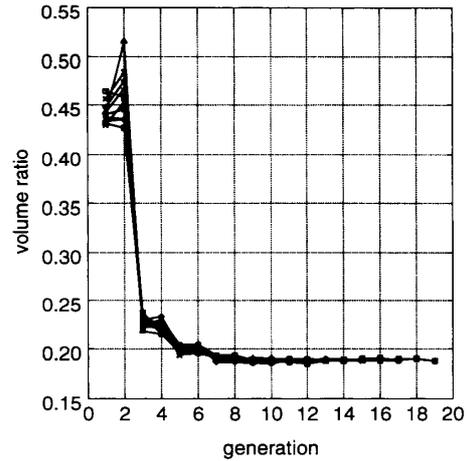
る.

$$\begin{cases} \sigma^j < \sigma_{al}^j & (\text{if } \sigma^j \geq 0) \\ |\sigma^j| < \min(\sigma_{buck}^j, \sigma_{al}^j) & (\text{if } \sigma^j < 0) \end{cases} \quad (11)$$

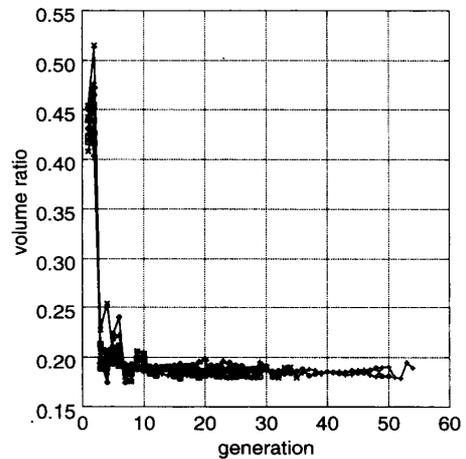
ここで, $\sigma_{buck}^j = (\pi^2 E_j I_j) / (l_j^2 A_j)$ である. また, σ_{al}^j は j 番目の部材の許容応力とし, 引張り側と圧縮側の許容応力を正の値とする.

E_j は部材 j の縦弾性係数, I_j は部材 j の断面 2 次モーメント, $\sigma_{al}^j (\geq 0)$ は部材 j の許容応力, σ_{buck}^j は部材 j のオイラー座屈強度である.

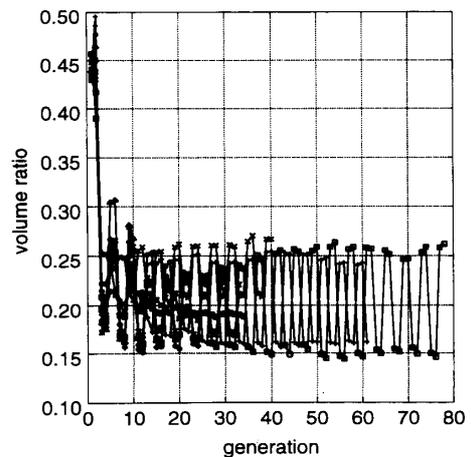
全応力設計の指数を $a=0.6, 0.8, 1.0$ と変えて, 10 回試行を行なう. 表7と表8に最終世代における数値結果, 図15と図17の最終形状は終了世代における体積比が最も小さい個体の形態を, 図16と図18に世代-平



(a) 世代-体積比 (a=0.6)



(b) 世代-体積比 (a=0.8)



(c) 世代-体積比 (a=1.0)

図16 世代-平均体積比の変化 (構造 A, 座屈考慮)

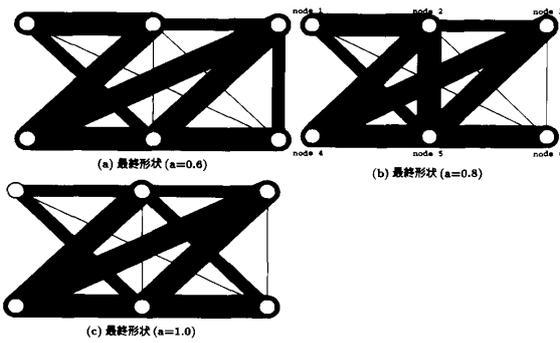


図17 各指数に対する最終形態（構造B，座屈考慮）（第一回目）

均体積比の変化を示す。表7と表8の各項目の上段が平均適応度で，下段が標準偏差である。

構造Aにおける世代に対する平均体積比の傾向（図16参照）は，座屈を考慮しない場合には指数 a によってほとんど変化しないが座屈を考慮した場合には指数 a が大きいほど大きく振動する。また，表7より最終世代数は指数 a が小さいほど少ない。このことから座屈を考慮すると各部材間で強度が同じでないことによると思われるが， a の値の影響が現われ，この場合， $a=0.8$ 程度が妥当と考えられる。

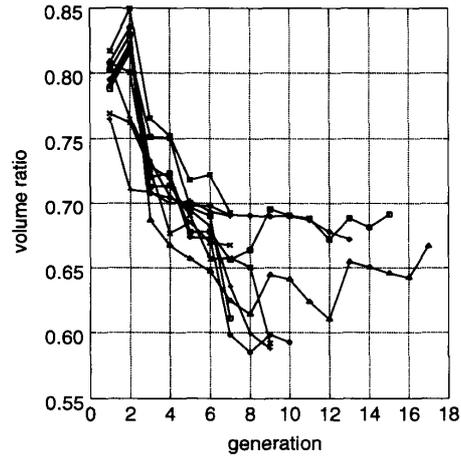
構造Bにおける世代と平均体積比の関係は図18が示すように，構造Aの場合ほど顕著な傾向が見られないが，指数 a が大きいほどGAプロセスの変動が大きい。

構造Aの最終形態（図15参照）は指数 a に関係なく同一のものが得られたが，構造B（図17参照）では指数 a によって多少形態の違いが見られる。

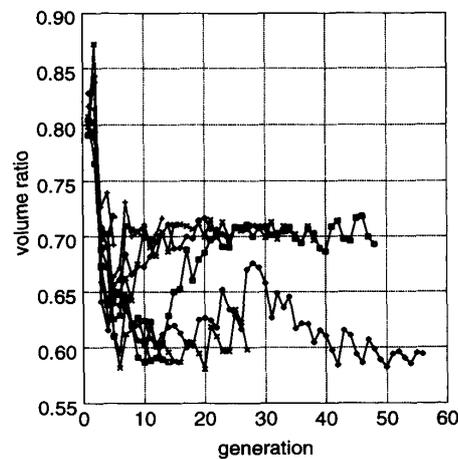
また，10回試行中で得られる構造形態は図19のようにB-a"~B-d"と分類できる。また，このときの各形態の発生頻度を表9に示す。

それぞれの指数で終了世代における体積比が最も小さい個体の最終形態をもとに，ランク0の部材断面積を有する部材を削除する。しかし，たとえば図17(b)の節点1と6，節点2と節点6，および節点3と節点6を連結する部材をすべて除去すると不安定になる。その理由はトラスでは節点はすべて滑節と仮定しているので節点5と節点6を連結する部材が回転自由となるからである。そこで部材重量の最も軽い節点3と節点6を連結する部材を残して他の2部材を除去して再計算する。その時の構造形態と発生頻度を図20と表10に示す。

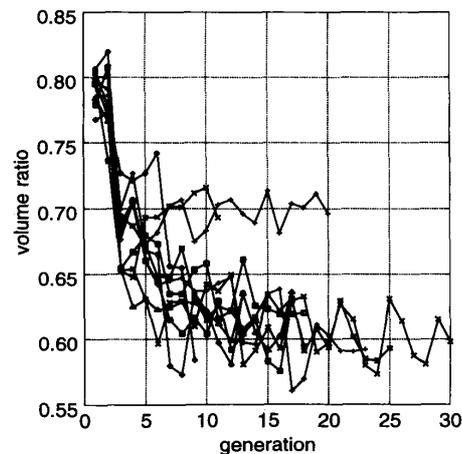
第1回目の試行では形態B-b"の発生頻度が高く，



(a) 世代-体積比 ($a=0.6$)



(b) 世代-体積比 ($a=0.8$)



(c) 世代-体積比 ($a=1.0$)

図18 世代-体積比の変化（構造B，座屈考慮）

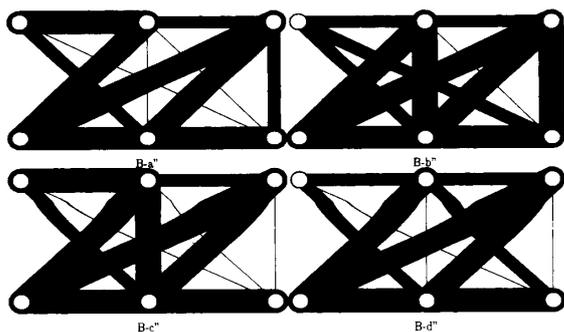


図19 構造形態 (構造 B, 座屈考慮) (第一回目)

表9 構造形態の分類 (構造 B, 座屈考慮) (第一回目)

係数 a	構造形態			
	B-a''	B-b''	B-c''	B-d''
0.6	3	6	1	0
0.8	1	8	1	0
1.0	4	3	0	3

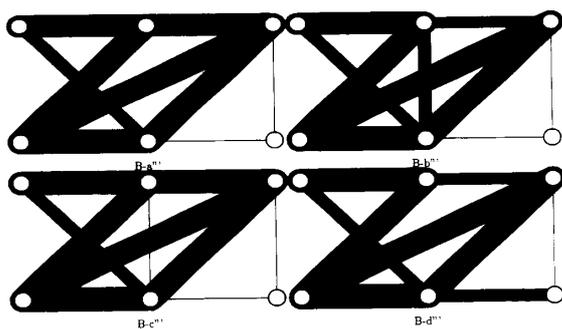


図20 構造形態 (構造 B, 座屈考慮) (第二回目)

表10 構造形態の分類 (構造 B, 座屈考慮) (第二回目)

係数 a	構造形態			
	B-a'''	B-b'''	B-c'''	B-d'''
0.6	0	0	0	10
0.8	0	5	5	0
1.0	10	0	0	0

ついで B-a'' である。つづく第 2 回目の試行 ($a=1.0$) ではすべて B-a''' の形態が創成されており、 $a=0.8$ では B-b''' と B-c''' (これは実際上は B-a''') が $a=0.6$ では B-d''' が創成された。B-d''' は形態上では節点 5 と 6 を結ぶ部材は存在する必要のない部材であって、こ

表11 最終結果 (構造 B, 座屈考慮) (第二回目)

item	$a=1.0$	$a=0.8$	$a=0.6$
volume ratio	0.428627	0.437011	0.484307
	0.012169	0.000248	0.023209
fitness	0.578630	0.569562	0.543557
	0.018852	0.006822	0.050523
generation	11.70	15.20	11.20
	4.52	9.69	5.83

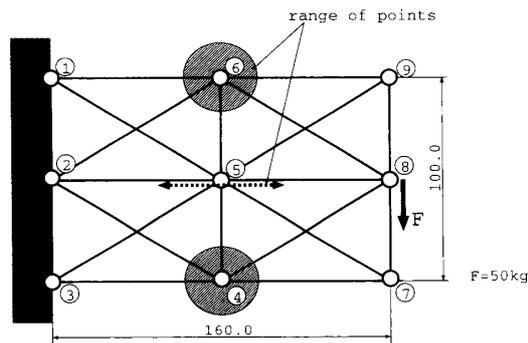


図21 構造 C

れを除去すると B-a''', B-c''' と同じになる。

第 1 回目と再計算 2 回目 (表11参照) の体積を比較すると $a=1.0$ で45%, $a=0.8$ で53%, $a=0.6$ で33%改善されている。体積比では $a=0.6$ の場合が最も優れており、ついでやや劣るが $a=0.8$ の場合である。

前項と本項の計算結果から構造 B では構造形態と体積比からみて $a=0.8$ と 1.0 で少なくとも 2 回 GA プロセスを繰り返すことによりほぼ最適な解が得られるものと考えてよいであろう。しかし、構造 B のように断面積が大幅に異なる部材から構成されているトラスは実際にはほとんど存在しないが、このようなトラスでも一応の収束解を得ることができる。

4.2 レイアウト最適化問題

4.2.1 構造 C (16部材トラス構造)

図21に解析対象構造を示す。同構造は筆者らが GA を用いた 2 次元連続体の形態 (この場合は、位相と寸法) の重量最小化問題¹²⁾ で取り上げた外形寸法と同じである。

荷重は節点 8 に 50 kgf, 部材の断面積は表12に示す断面積から選択する。この断面積は $0.10(\text{mm}^2) \sim 25.0(\text{mm}^2)$ の 32 等分したものである。エリート保存戦略に FSD を組み合わせたハイブリッド法で解析を行なう。また、指数 a は 0.8 と設定している。

表12 ランクと部材断面積

rank	cross.area(mm ²)	rank	cross.area	rank	cross.area
0	0.010	11	8.935	22	17.771
1	0.903	12	9.739	23	18.574
2	1.706	13	10.542	24	19.377
3	2.510	14	11.345	25	20.180
4	3.313	15	12.148	26	20.984
5	4.116	16	12.952	27	21.787
6	4.919	17	13.755	28	22.590
7	5.723	18	14.558	29	23.394
8	6.526	19	15.361	30	24.197
9	7.329	20	16.165	31	25.000
10	8.132	21	16.968		

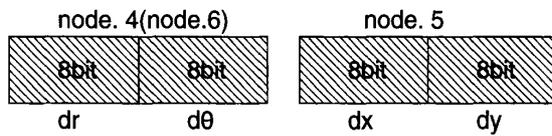


図22 染色体の構成(2)

表13 FSDの実施間隔

item	2 generation	4 generation	6 generation
fitness	average 0.911830	0.914126	0.879539
	S.D. 0.019581	0.034019	0.072231
volume ratio	average 0.065944	0.065537	0.070876
	S.D. 0.004759	0.003663	0.004289
generation	average 36.90	44.50	37.40
	S.D. 10.46	19.76	10.25

*S.D. is standard deviation

*Average are mean values of ten trials

節点4と節点6は半径R=10[mm]の円形状網目部分内でxとy方向に、節点5は±30[mm]の範囲でx方向に移動可能とする。

節点移動のサブストリングは図22に示すように節点4とdrとdθ用にそれぞれ8ビット、節点5のdx, dy用にそれぞれ8ビットを割り当てた。しかし、dyは移動の対象としていない。設定パラメータは個体数=40, 交差確率=0.8, 突然変異率=0.01, 終了条件は前の数値実験と同じに、FSDの指数a=0.8に固定し、FSDを適用する世代は2世代, 4世代, 6世代間隔ごとに変えて数値実験を行なった。

最終結果を表13に示す。同表から平均適応度, 平均体積比は2, 4世代間隔ともほぼ同じであるが, 6世代間隔となると2, 4世代間隔に比べて平均適応度はやや低めに, 平均体積比はやや高めに求められている。

表14 個体数の検討

item	pop. (20)	pop. (40)	pop. (60)
fitness	average 0.908849	0.911830	0.924543
	S.D. 0.040786	0.019581	0.013805
volume ratio	average 0.068697	0.065944	0.064863
	S.D. 0.006608	0.004759	0.003754
generation	average 18.30	36.90	50.50
	S.D. 6.48	10.46	15.58

*Pop. is population

*S.D. is standard deviation

*Average are mean values of ten trials

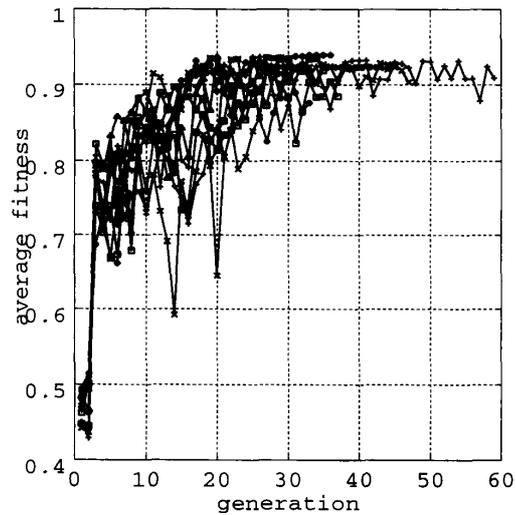


図23 世代-平均適応度

平均終了世代数は2世代間隔が比較的短かった。以上から、FSDの実施間隔は2世代か3世代間隔が良いと思われる。

つぎに、FSDの実施間隔は2世代間隔とし、個体数のみ20, 40, 60と変化させたときの最終結果を表14に示す。

個体数20は平均終了世代数は最も少ないが、平均適応度は最も低く、平均体積比は最も大きい。個体数20では十分ではない。一方個体数60が最も平均適応度が高く、検討した個体数の中では平均体積比も最も小さいが、平均終了世代数は最も大きい。

以上から、収束性や最適性の面から個体数は40, 全応力設計の実施間隔は2世代が適当ではないかと思われる。個体数40, 実施間隔2世代のときの世代と平均適応度, 世代と平均体積比の変化を図23と図24に示す。

図25に示すように、10回試行中、試行9の失敗例があるものの、その他の試行ではレイアウト位相はほぼ文献12)と13)と同じである。試行1, 5, 7, 8および10

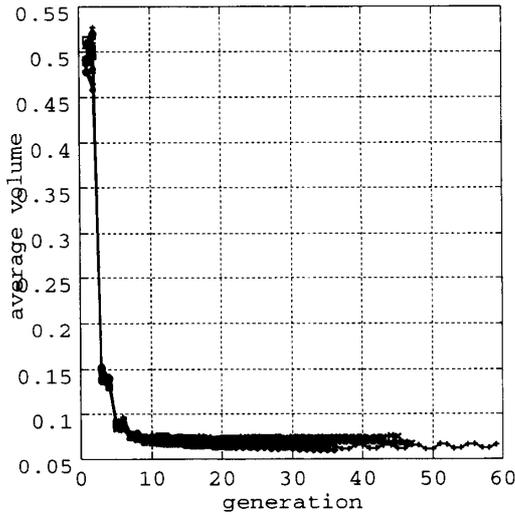


図24 世代平均体積比

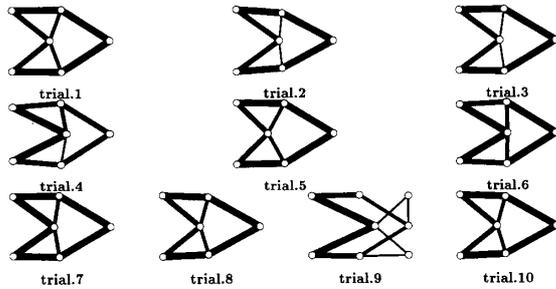


図25 各試行における最終形状 (個体数40, 2世代ごとにFSD実施)

は文献12)で得られた形態にほぼ近い。しかし、さらに詳しくみると試行8と試行10は均質化法¹³⁾により求められた形態に近い。いずれにしても試行9を除いてレイアウトは文献12)と13)とほぼ同じである。

4.2.2 構造 D (21部材トラス構造)

富田と登坂がレイアウト最適設計問題⁶⁾として検討対象として取り上げた図26に示すトラスに本手法による最適化を試みる。

荷重はトラスの上弦節点に均一に作用しているものとする。部材jの断面積は表15に示す断面積から選択する。部材断面積と遺伝子の関係は同表に示す通りで、一つの部材断面積は3ビットの2進数で表現する。これらは文献(6)と同じである。

節点6, 7, 8がy方向に [0.150 mm] 内で、節点1, 5がx方向に [0.25 mm] 内で移動可能とし、前述の方法でコード化した。GA パラメータは表16に示す通りである。

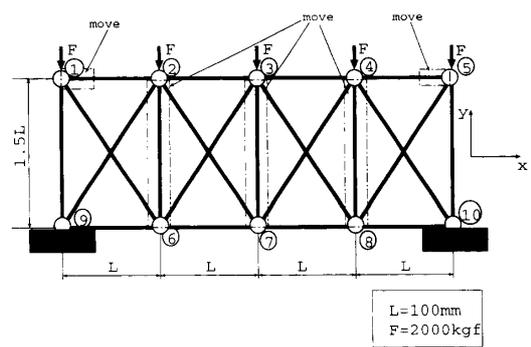


図26 構造 D

表15 部材断面積と遺伝子

cross. area(A_i)	1.00	20.00	40.00	60.00	80.00
string	000	001	010	011	100
cross. area(A_i)	100.00	120.00	140.00		
string	101	110	111		

(単位: mm²)

表16 最適化のためのパラメータ

type	rank	string	population size	crossover	mutation
D	8	87	40	0.8	0.01

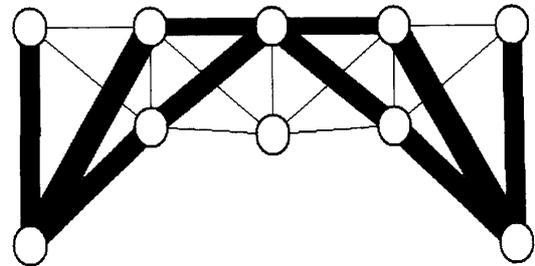


図27 最終レイアウト (第一回目)

この試行には最も適応度の高い個体を1個そのまま次の世代に残すエリート保存戦略を採用し、全応力設計の指数を $a=0.8$ とする。10回試行中の終了世代における体積比が最も小さい個体の最終レイアウトを図27に示す。また、最終レイアウトは図28と表17のように分類できる。さらに、前述と同じ方法でランク0の部材を除去して再計算した結果を表17に示す。同表より再計算しても体積比はほとんど改善されなかったが、第一回目ではD-aのレイアウトの出現率が高か

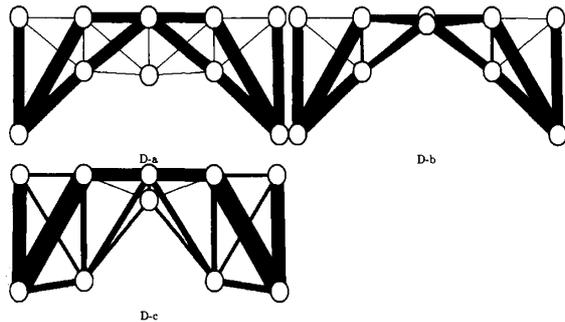


図28 構造Dの構造レイアウトの分類 (第一回目)

表17 最終結果の比較

trial	item	fitness	volume ratio	generation	structure layout		
					D-a	D-b	D-c
first		0.635441	0.342475	28.30	6	2	2
		0.052817	0.019735	11.76			
second		0.639211	0.365287	19.60	3	0	7
		0.020020	0.016927	12.38			

ったが、第二回目ではD-cの出現率が高かった。

文献6)と比較するとD-bは同文献で引用されているGAによる解、D-aとD-cの中間レイアウトが同文献で新たに提案している方法によって求められた解に近かった。

5. 結 言

トラスの部材の断面積と節点の移動を設計パラメータとする重量最小化問題において筆者らの提案した方法を4種類のトラスに適用し、数値実験を行なったところ、次のことが分かった。

(1) 全応力設計の指数の値 $a=0.8$ 程度を選ぶと適応度、体積減少比、終了世代数の点から穏当な結果が得られた。

(2) 第1回目の計算後、断面積が極端に小さい部材で除去可能な部材を順次除去することにより最適構造

形態のトラスを求める見通しが得られた。

(3) 文献6)の方法を参考にして、節点の移動を考慮に入れたレイアウト最適なトラスを求める見通しが得られた。

しかし、適用例が4例にすぎず、しかも限られた部材数、選択できる断面積の範囲と数、移動できる節点数と移動量をパラメータとするトラスに関する結論である。したがって明確な結論を得るにはさらに適用例を増やす必要がある。

参 考 文 献

- 坂本, 尾田: 遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法, 機論, 59-562A, 1568/1573 (1993)
- 中西, 中桐: トポロジーの境界輪体による表現とその構造最適化への応用, 機論, 59-567A, 2783/2788 (1993) No. 567,
- 中西, 中桐: 境界輪体によるトラスの位相最適化, 機論, 61-584A, 849/854 (1995)
- 山崎: トンネル法によるトラス構造形態の最適化, 第71期通常総会講演論文集, No. 940-10, 339/341 (1994)
- 石田他: GIRMを用いたトラス構造物の最適設計, 機論, 61-58A, 205/210 (1995)
- 富田, 登坂: 可変突然変異率を有する遺伝的アルゴリズムによるトラス構造物の最適設計問題, 機論, 61-585A, 1096/1101 (1995)
- 朝山, 長谷川, 川面: GAを利用した応力制約下におけるトラス構造の寸法最適化に関する一数值実験 (主として全応力設計とGAを組み合わせたハイブリット法の検討), 機論, 62-597A, 1234/1241 (1996)
- Berke, L. and Khot, N. S., Use of Optimality Criteria for Large Scale Systems, AGARD Lecture Series No. 170 on Structural Optimization, AGARD-LS-70 (1974)
- 大坪, 鈴木: 有限要素法 [4] 構造最適設計, シミュレーション, 13-4, 44/49 (1994)
- 尾田, 岡田: ニューラルネットワークによる不静定トラスの最適設計, 機論, 60-577A, 2163/2168 (1994)
- 杉本: GAの工業設計への応用に向けて, 数理科学, 353, 45/50 (1992)
- 長谷川, 川面: GA利用による機械構造物の位相最適化の一方法, 機論 61-581A, 183/190 (1995)
- Suzuki, K. and Kikuchi, N., A Homozemization Method for Shape and Topology Optimization, Comp. Methods in Applied Mech. and Engrg 93, 291/318 (1991)